

Für Mensch & Umwelt

Umwelt   
Bundesamt

Journalistenworkshop “Stickstoff – die unterschätzte Umweltgefahr”

# Lebenswichtiger Problemstoff – Eine Einführung in die Stickstoffproblematik

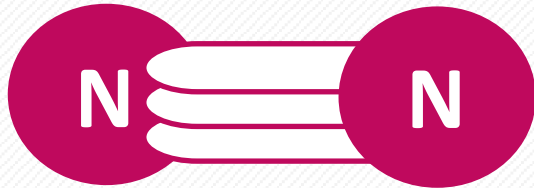
Markus Geupel

Fachgebiet II 4.3 "Luftreinhaltung & terrestrische Ökosysteme"

## Gliederung

- 1 STICKSTOFFFORMEN, BEGRIFFSDEFINITION**
- 2 BIOLOGISCHER STICKSTOFFKREISLAUF**
- 3 WIRKUNGEN DER VERBINDUNGEN DES STICKSTOFFS**
- 4 ANTHROPOGENE STICKSTOFFFIXIERUNG GLOBAL UND IN DEUTSCHLAND**
- 5 BESTEHENDE REGELUNGEN UND WARUM SIE NICHT AUSREICHEN**
- 6 INTEGRIERTE KONZEPTE**

## Stickstoffformen, Begriffsdefinition



$N_2$  --- elementarer Stickstoff



Organischer Stickstoff

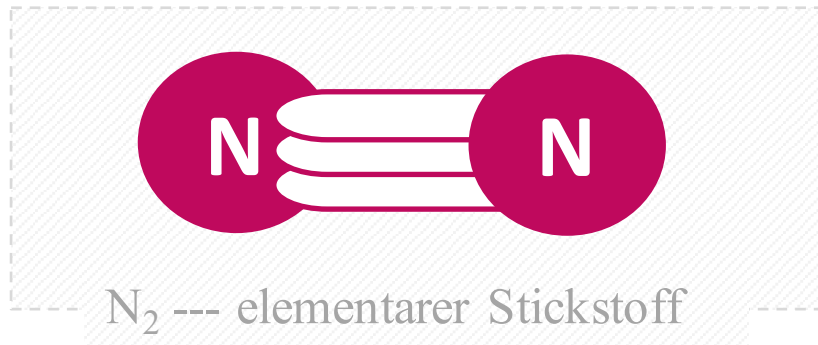
### reaktive Stickstoffverbindungen



$NO_X$  --- oxidierter Stickstoff  
 $NH_Y$  --- reduzierter Stickstoff

anorganischer Stickstoff

## Stickstoffvorkommen, biologischer Stickstoffkreislauf, limitierender Faktor



### Elementarer Stickstoff

- 78 % der Atmosphäre
- Stabile Dreifachbindung zwischen zwei Stickstoffatomen
- Sehr hoher Energieaufwand nötig, um die Dreifachbindung zu spalten
- Biologische Katalyse: NITROGENASE
- Hohe Energiezufuhr: BLITZSCHLAG
- Technisch: HABER-BOSCH

### Stickstoffoxide

- Natürlich: BLITZSCHLAG
- Anthropogen: Verbrennungsprodukt
- Verkehr, Energie, Industrie

### Reduzierter Stickstoff:

- Natürlich: Abbau org. Substanz (Ammonifikation), biologische N-Fixierung (Nitrogenase)
- Anthropogen: Haber-Bosch-Verfahren

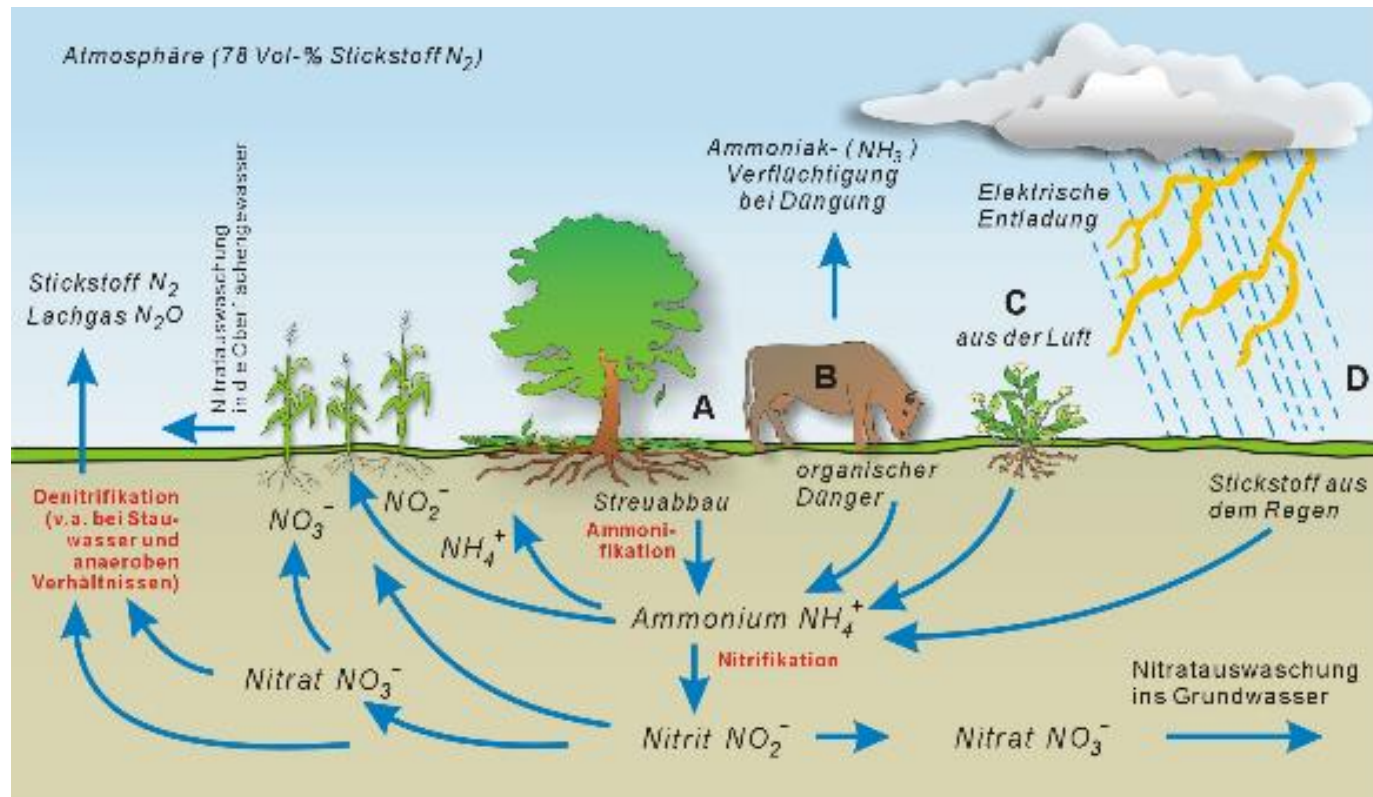
### Nitrat

- Entsteht aus Stickstoffoxiden in der Atmosphäre
- Entsteht bei der Nitrifikation im Boden

### Lachgas

- Nebenprodukt bei der Denitrifikation
- Adipinsäuresynthese

## Stickstoffvorkommen, biologischer Stickstoffkreislauf, limitierender Faktor



### Stickstoffkreislauf

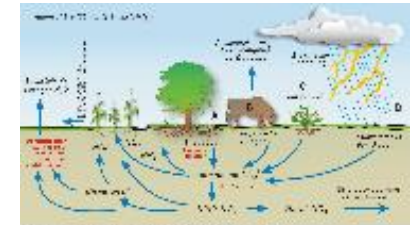
- Eng geschlossener Kreislauf
- Alle Lebewesen sind angewiesen auf Reaktiven Stickstoff
- Baustein in pflanzlichen und tierischen Proteinen (Eiweißen) und im Erbgut (DNA)
- Nährstoff
- Eingebaut in Lebewesen spricht man von organischem Stickstoff
- Der Körper eines Erwachsenen Menschen (Körpergewicht 70 kg) enthält 2 kg Stickstoff
- Effektive Nutzung von Reaktivem Stickstoff
- Die Natur kennt praktisch keine Verluste von reaktivem Stickstoff
- Frei werdender anorganischer Stickstoff wird praktisch sofort von Pflanzen für Wachstum aufgenommen
- Denitrifikation  $NO_3^- \rightarrow N_2$  „Nitratatmung“ (Abbauleistung hängt u.a. vom Sulfidgehalt ab)
- N als Nährstoff limitierender Faktor in terrestrischen Systemen

Quelle: Lernort Boden, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2006.

## Limitierender Faktor: Nährstoff Stickstoff im Boden

### LANDWIRTSCHAFTLICHE SYSTEME

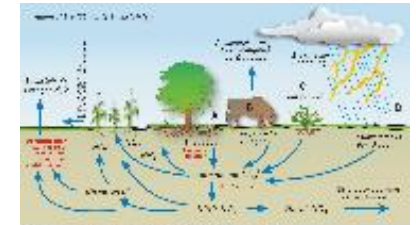
- in landwirtschaftlichen Systemen kann durch zusätzliche Stickstoffzufuhr zusätzliches Pflanzenwachstum erzielt werden
- in den meisten Böden sind andere Nährstoffe wie Kalium oder Phosphat zunächst in ausreichendem Maße vorhanden
- Die natürlicherweise begrenzte Stickstoffverfügbarkeit in landwirtschaftlichen Systemen hat früher die Qualität und Menge der Ernten bestimmt
- Heute ist Stickstoff in anorganischer Form als Düngemittel nahezu unbegrenzt verfügbar
- → der gezielte Einsatz hat entscheidenden Einfluss auf die Menge der landwirtschaftlichen Produktion und damit auf die Ernährung einer schnell wachsende Weltbevölkerung



## Limitierender Faktor: Nährstoff Stickstoff im Boden

### NATÜRLICHE SYSTEME

- Auch in natürlichen oder semi-natürlichen Ökosystemen wird durch zusätzliche Stickstoffzufuhr ein zusätzliches Pflanzenwachstum erzielt
- Hier sind es nicht Kulturpflanzen, die gezielt von der zusätzlichen Stickstofffracht profitieren, sondern Pflanzen, die unter natürlichen Nährstoffbedingungen (weniger Stickstoff) weniger Konkurrenzstark wären
- Jede Pflanzenart hat eine ganz bestimmte Lieblingssmahlzeit – ein bestimmter Mix aus Nährstoffen, Licht, Temperatur und Feuchtigkeit
- Von zusätzlichem Stickstoff profitieren daher nur wenige Pflanzenarten durch gesteigertes Wachstum → Verdrängung von anderen Arten, die Stickstoff nicht so gerne mögen, bzw. auf eine ausgewogenere Ernährung achten
- Eutrophierung
- Der zusätzliche Stickstoff kommt meistens aus der Luft





## Limitierendes Element: Eutrophierung durch Stickstoffeinträge

### Terrestrische Ökosysteme



[1] Heiden auf sandigen Böden (Calluna-Heiden)

Foto ©: Maren Meyer-Grünefeldt

[2] Halbtrockenrasen auf karbonatischem Untergrund

Foto ©: Bundesamt für Naturschutz



[3] Birken-Eichenwald feuchter bis frischer Standorte

Foto ©: Fabian Wankmüller

[4] Sandtrockenrasen

Foto ©: Robin Schmidt

### GEFÄHRDUNGURSACHE

- Rote Liste Pflanzenarten, Standortveränderungen durch Nährstoffeinträge
- Rote Liste Biotoptypen, Standortveränderungen durch Nährstoffeinträge



## Limitierendes Element: Eutrophierung durch Stickstoffeinträge

### Profiteure unter den Pflanzenarten



[1] Brennnessel (*Urtica dioica*)

Foto ©: Brennnessel at Burg Isenberg, Hattingen, Photo by Simplicius, 2004, GNU/FDL,

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brennnessel.jpg>

[2] Dichter (untypischer)

Brombeerunterwuchs in Kiefernforst

Foto ©: Markus Geupel

[3] Dichter (untypischer)

Holunderunterwuchs in Kiefernforst

Foto ©: Gerhard Hofmann, Eberswalde

[4] Knoblauchsrauke

Foto ©: Knoblauchsrauke (*Alliaria petiolata*),  
Fotograf: Anke Hüper, Karlsruhe,

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Knoblauchkraut01.jpg>

## Limitierendes Element: Eutrophierung durch Stickstoffeinträge Meeres- und Küstenökosysteme



[1]



[2]



[3]

[1] Grünalgen auf Wattflächen an der Nordsee

Foto ©: Wera Leujak

[2] Schaumalgen am Nordseestrand

Foto ©: Wera Leujak

[3] In Folge von Sauerstoffmangel verendete Fische am Eckernförder Südstrand am 13.9.2017

Foto ©: Ivo Bobsien LLUR

### FOLGEN DER EUTROPHIERUNG

- Algenwachstum
- Massenhafter Abbau von organischer Biomasse durch Bakterien
- Sauerstoffverbrauch
- Sauerstoffarme bzw. -freie Regionen
- Gefahr für Fische und andere Tiere

## Direkte Umweltwirkungen durch Stickstoffverbindungen



- klimarelevantes Gas (GWP 265), trägt 6 % zum globalen Klimawandel bei
- Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht, hat mittlerweile die größte Rolle beim Abbau stratosphärischen Ozons übernommen



- Direkte toxische Wirkungen auf Blattorgane
- Indirekt durch Eutrophierung und Versauerung
- Critical Level  $1 \mu\text{g m}^{-3}$  empfindliche Ökosysteme,  $3 \mu\text{g m}^{-3}$  für höhere Pflanzen
- Trägt zur Feinstaubbildung bei (→ sekundärer Feinstaub)



- Gesundheitliche Wirkungen bei stark belastetem Trinkwasser (Säuglingsblausucht, Methämoglobinämie)
- $50 \text{ mg l}^{-1}$



- vermindert die Lungenfunktion und beeinträchtigt das Herz-Kreislauf-System, Reizung der Schleimhäute
- wichtigste Vorläufersubstanz für die Bildung von bodennahem Ozon
- Trägt zur Feinstaubbildung bei (→ sekundärer Feinstaub)
- Materialschäden als Salpetersäure (HNO3)



## Wie gelangt Stickstoff durch menschliches Handeln in die Umwelt?

### REDUZIERTER STICKSTOFF: HABER-BOSCH-SYNTHESE

- Ammoniaksynthese bei hohem Druck, hohen Temperaturen und Eisenkatalysator
- industrieller Prozess entwickelt vor etwa 100 Jahren in Deutschland (Patent 1911, erster Reaktor 1913)
- 1- 2 % der globalen Energieproduktion bzw. 3 - 5 % der globalen Erdgasproduktion
- 160 Tg NH<sub>3</sub> im Jahr 2010
- Hauptproduzenten: China 32 %, Indien, 9 %, Russland 8 %, Deutschland < 2 %
- Grundlage für die Mineraldüngerproduktion (80 %) und die chemische Industrie (20%)
- Preis für Stickstoffdünger energiepreisabhängig: 0,5 - 0,6 € kg<sup>-1</sup> (2017)
- Mineraldüngerabsatz in Deutschland 2015/2016: 1.700 Gg



Hochdruck-Reaktor (Stahl) zur Ammoniak-Synthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren. Erbaut 1921 von der Badischen Anilin- und Sodafabrik AG Ludwigshafen am Rhein. Aufgestellt auf dem Gelände der Universität Karlsruhe. © Drahrub  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ammoniak\\_Reaktor\\_BASF.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ammoniak_Reaktor_BASF.jpg)

## Wie gelangt Stickstoff durch menschliches Handeln in die Umwelt

### STICKSTOFFOXIDE

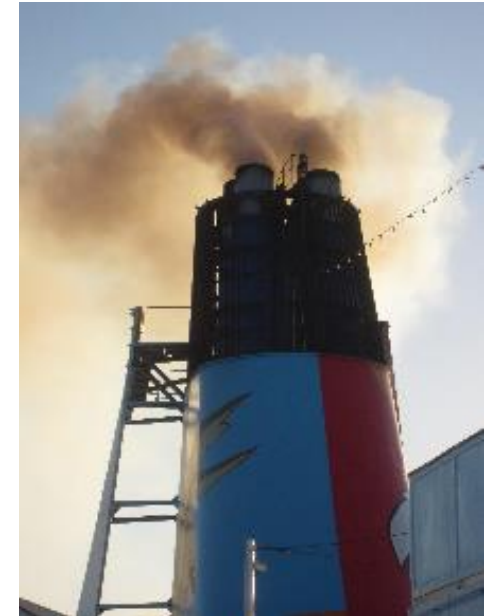
Endotherme Reaktion → hoher Energieaufwand erforderlich, um aus Stickstoff und Sauerstoff Verbindungspartner zu machen →

Verbrennung fossiler Energieträger

- Thermisches NO<sub>x</sub> > 1000°, abhängig von Druck, Verweilzeit
  - Diesel, Benzin, Erdgas
- Brennstoff-NO<sub>x</sub>
  - Braunkohle (80%), Steinkohle (ca. 50%), Schweröl (ca. 50%)
- Biogenes NO<sub>x</sub>
  - Landwirtschaftliche Mineral- und Wirtschaftsdüngeranwendung (10 % der gesamten NO<sub>x</sub> Emissionen → übrigens nicht Berichterstattungspflichtig)

### BIOLOGISCHE STICKSTOFFFIXIERUNG

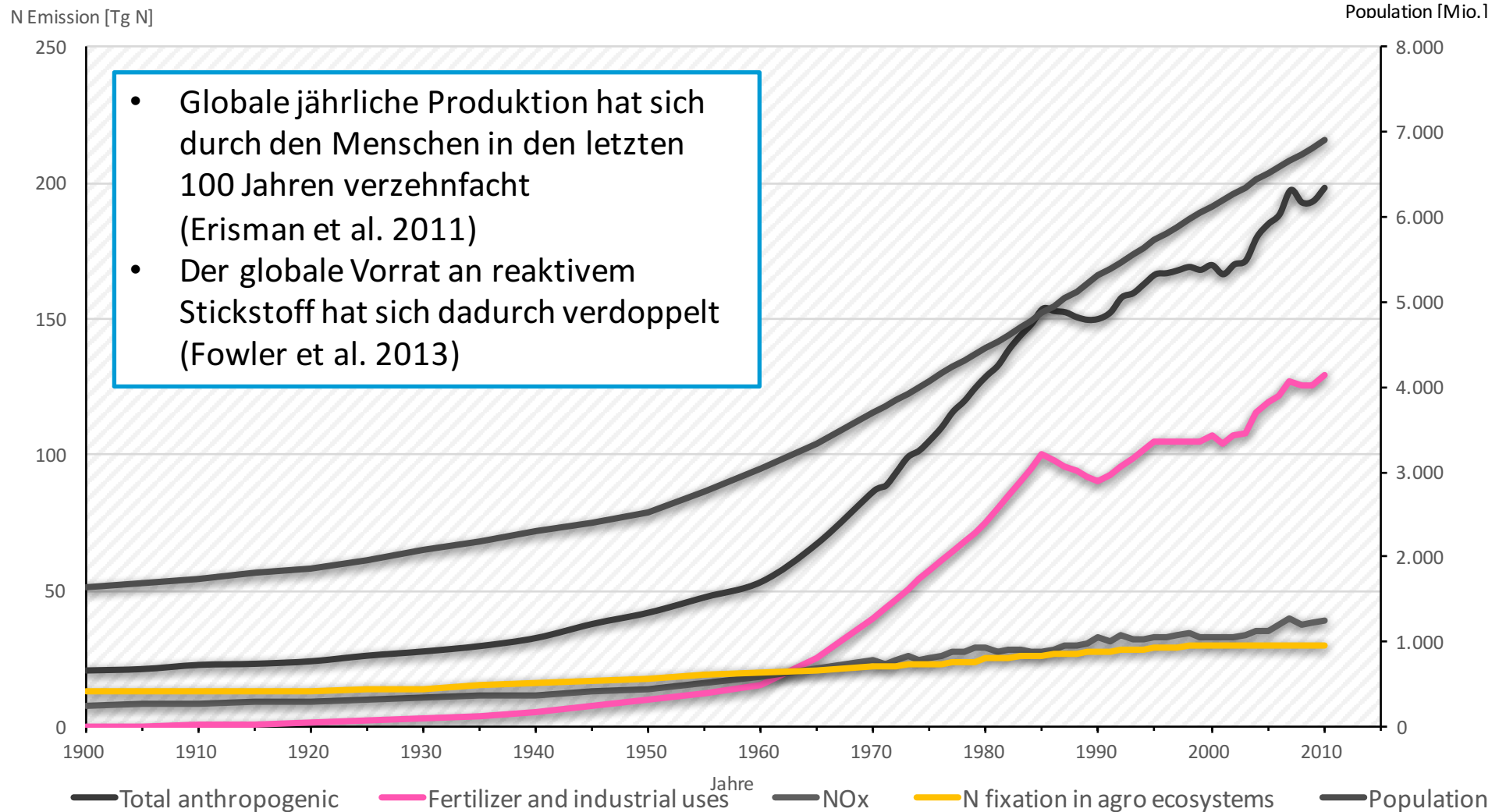
- Anbau von Leguminosen
- Bakterien, die in Symbiose mit Pflanzenarten leben
- Nitrogenase zerlegt N<sub>2</sub> und formiert NH<sub>4</sub><sup>+</sup>
- Soja, Erbsen, Bohnen, Erdnüsse



Abgas-Emission bei  
Fährschiffahrt durch  
Schwerölverbrennung  
© Markus Geupel



## Wie gelangt Stickstoff durch menschliches Handeln in die Umwelt?

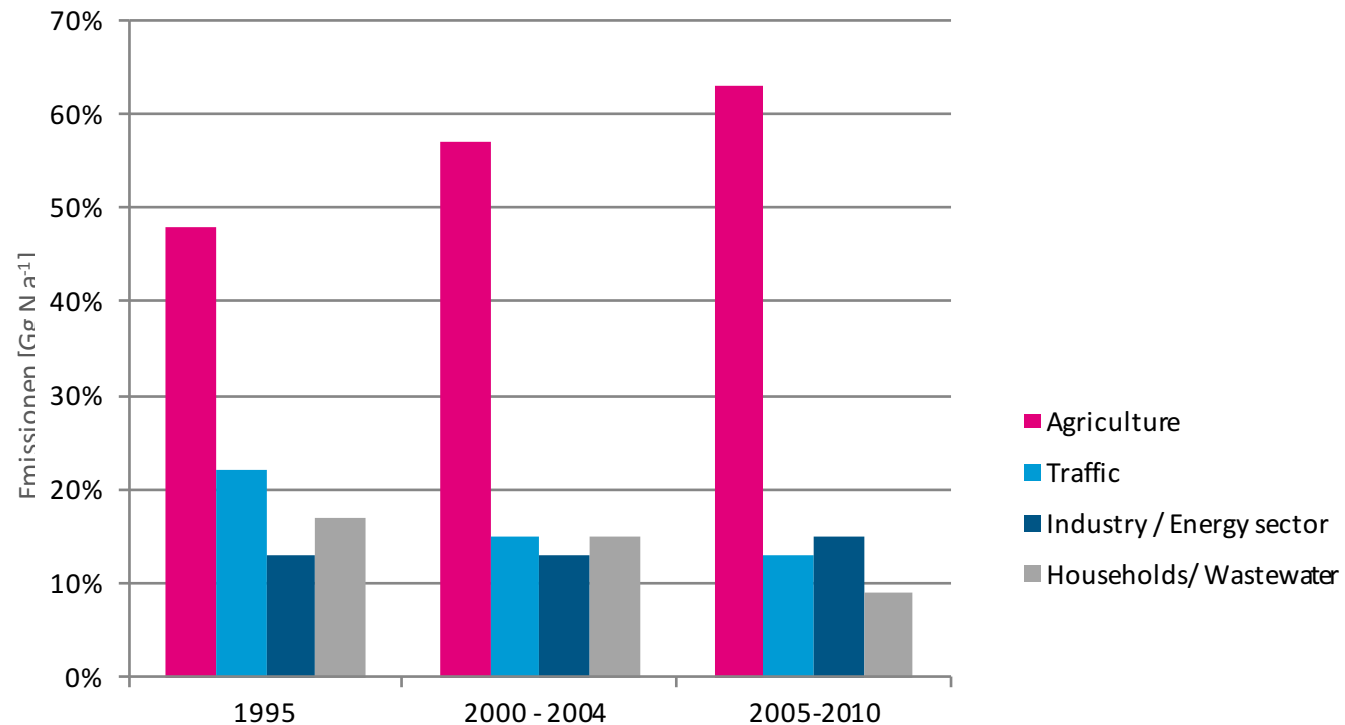


Fowler, D. et al. (2013) The global nitrogen cycle in the twenty-first century. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 368.

Erisman, J. W., et al. (2011). "Reactive nitrogen in the environment and its effect on climate change." Current Opinion in Environmental Sustainability 3: 281-290.

## Die Stickstoffemissionen in Deutschland - Hauptverursacher

Entwicklung der Anteile der Hauptverursacher  
an den gesamten N-Emissionen



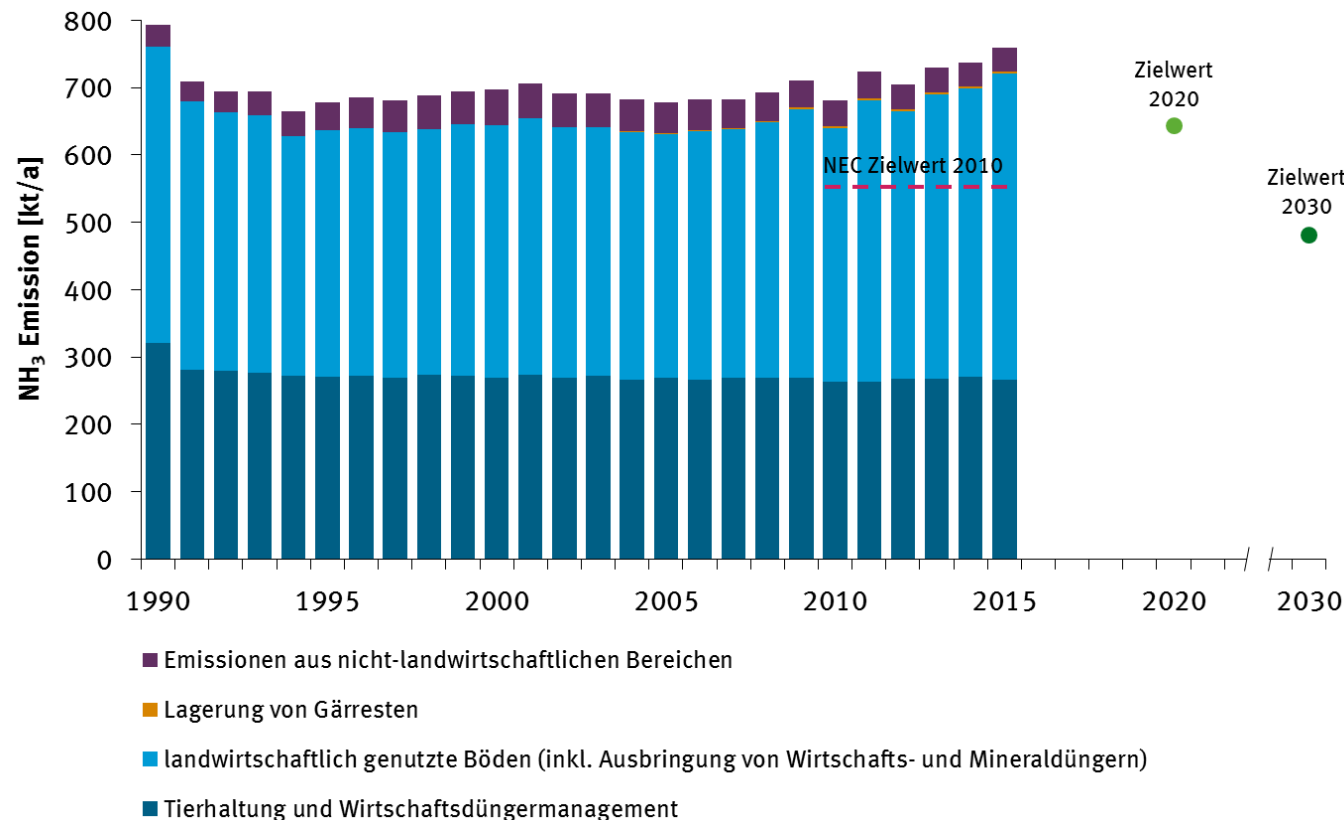
Die gesamten N-Emissionen in den vergangenen 20 Jahren sind rückläufig

Auch die Emissionen der Landwirtschaft sind rückläufig, wenn auch in geringerem Maße

Der Anteil der Landwirtschaft an den gesamten N-Emissionen in Deutschland hat in den vergangenen 20 Jahren deutlich zugenommen



## Ammoniakemissionen in Deutschland seit 1990

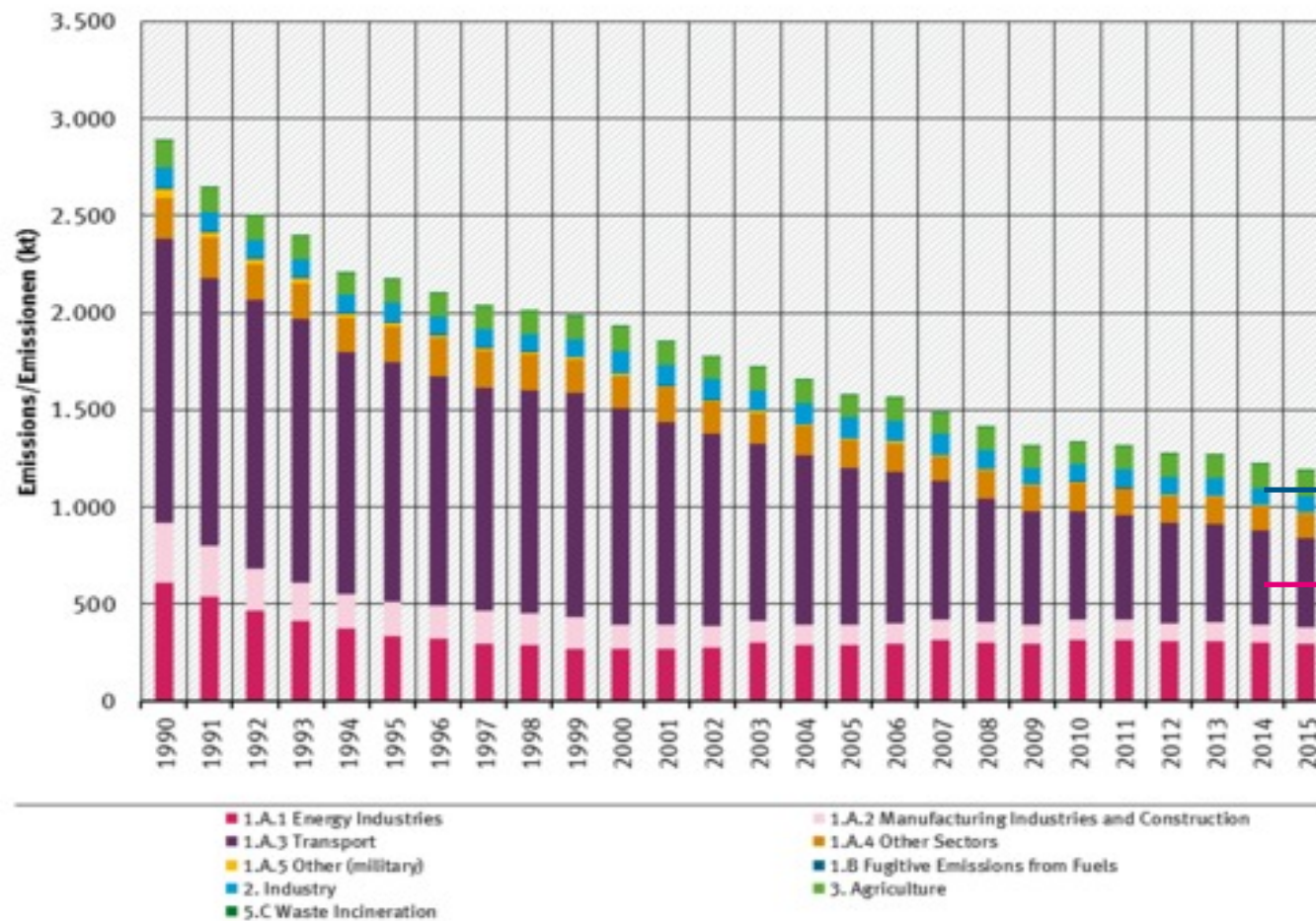


- 95 % entstehen in der Landwirtschaft
- NH<sub>3</sub> Emissionen sind tendenziell leicht gestiegen seit Anfang 1990er Jahre
- Verringerung der Emissionen aus der Tierhaltung wegen Rückgang der Rinderbestände.
- Steigerung der Emissionen aus Mineraldüngung wegen Zunahme an Harnstoffdünger
- Ziel der NEC-Richtlinie (550 kt) wurde deutlich verfehlt.
- Neue Zielwerte aus NERC-Richtlinie sind relative Reduzierungsverpflichtungen:
  - 2020: 5% gegenüber 2005
  - 2030: 29% gegenüber 2005

## Stickstoffoxidemissionen in Deutschland seit 1990

### Nitrogen Oxide / Stickstoffoxide

Emissions per Sector / Sektorale Emissionen



- 60 % Verminderung seit 1990
- 90 % Verbrennung von Brennstoffen
- Transportsektor (- 70 %) und Energieproduktion (-50%) sind die größten Emittenten

1051 kt seit 2010

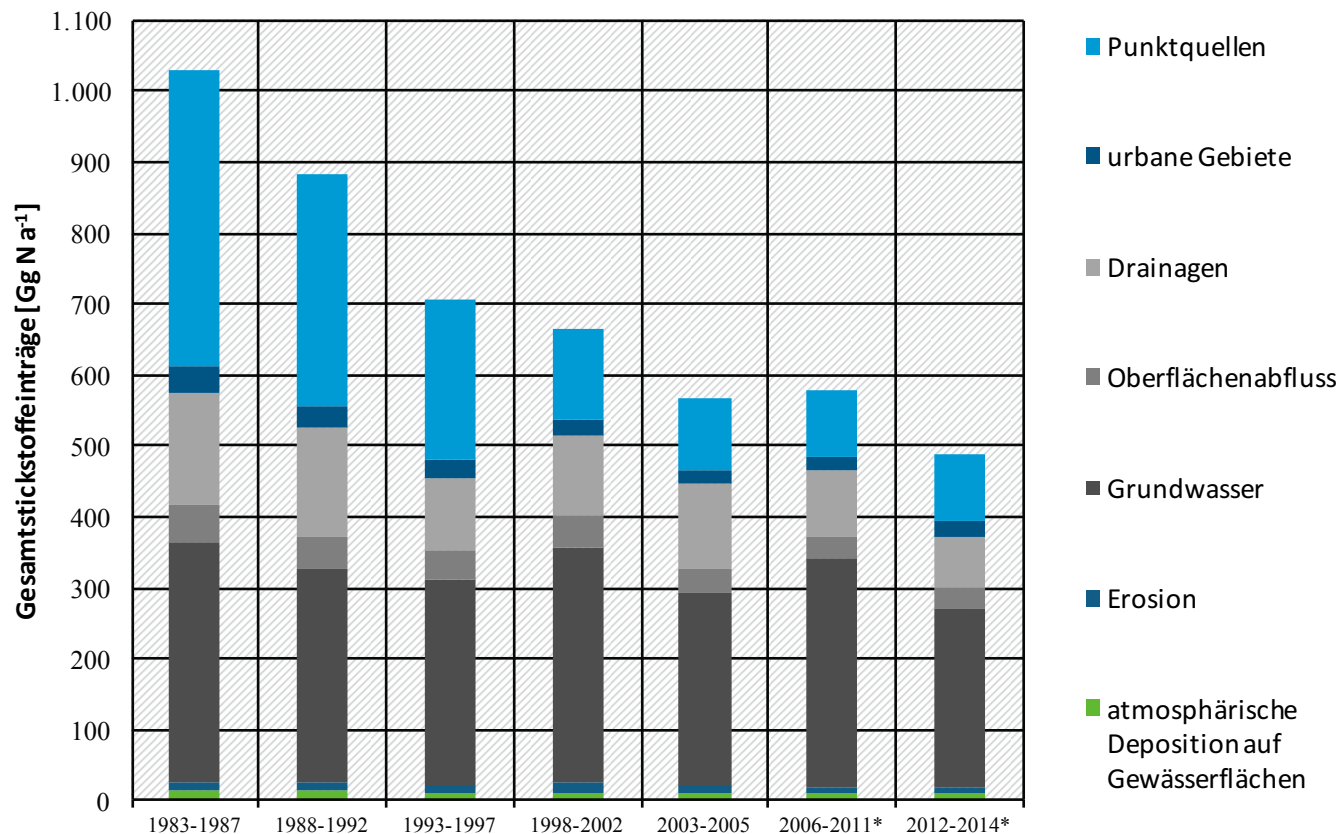
- 65 % ab 2030 gegenüber 2005

Quelle: German Emission Inventory (03.01.2017)



## Stickstoffeinträge in Oberflächengewässer in Deutschland seit 1990

### Stickstoffeinträge aus Punktquellen und diffusen Quellen in die Oberflächengewässer in Deutschland



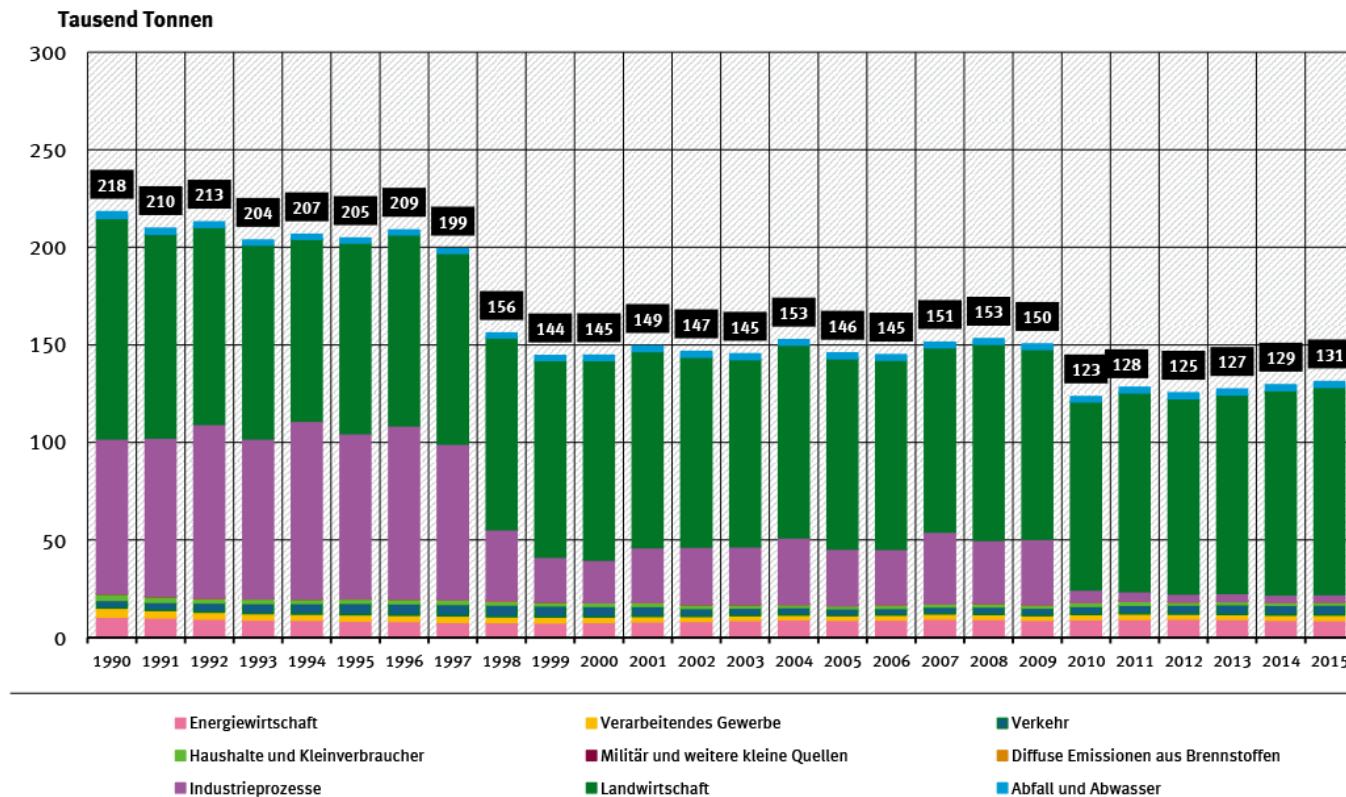
- Deutlicher Rückgang bei den Punktquellen
- Kaum ein Trend bei den diffusen Einträgen
- Stickstoff verbleibt im Boden und Grundwasser auch wenn Landwirte sparsamer düngen

\* zum Teil geändertes methodisches Vorgehen

## Lachgasemissionen in Deutschland seit 1990

- -30 % seit 1990
- Rückgang wurde zu zwei Dritteln durch emissionsmindernde Maßnahmen im Bereich der Adipinsäureproduktion erreicht
- Hauptquellen für Distickstoffoxid-Emissionen sind stickstoffhaltiger Dünger in der Landwirtschaft und die landwirtschaftliche Tierhaltung.

Distickstoffoxid-Emissionen nach Kategorien

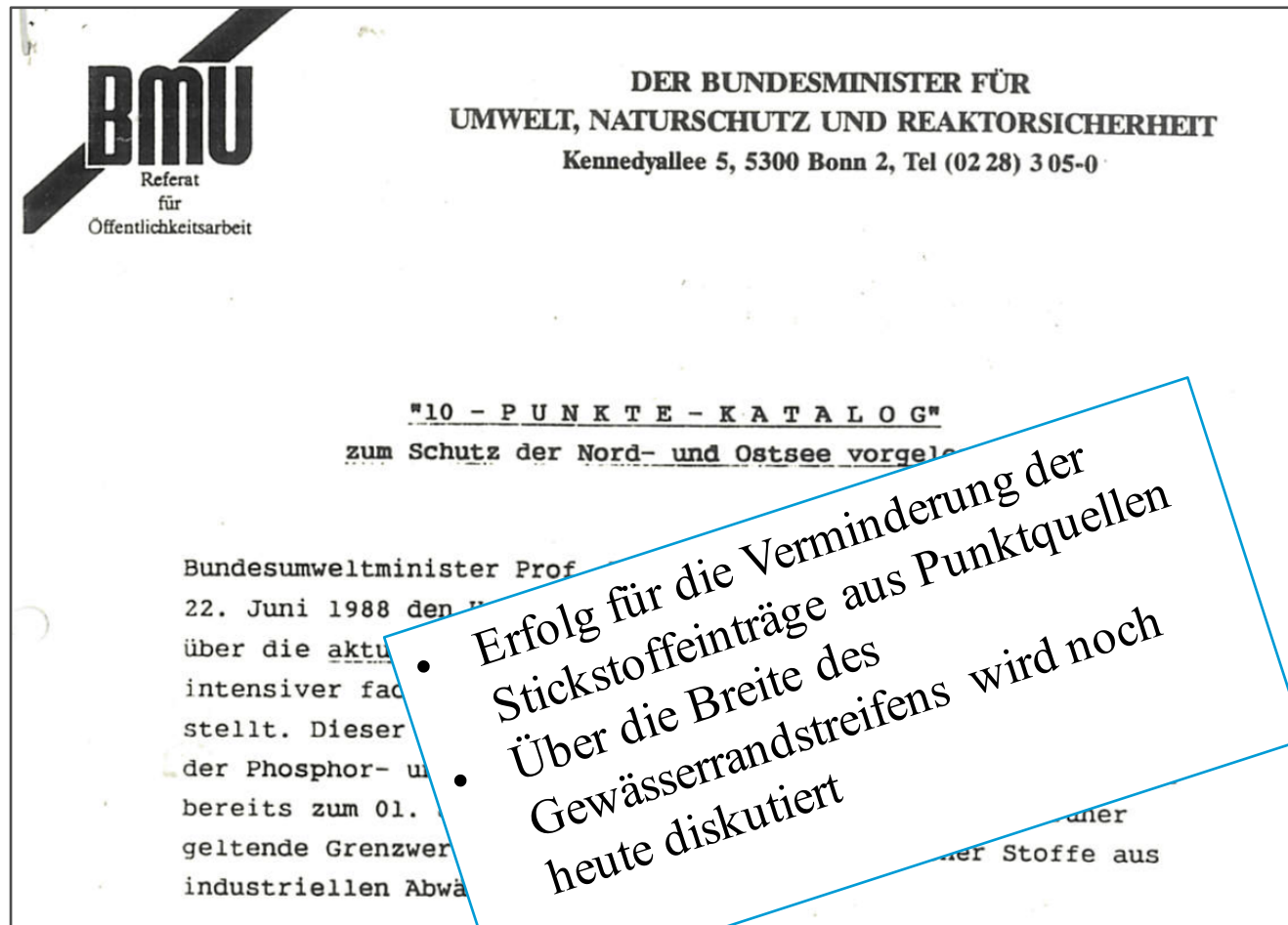


Emissionen ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft  
Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr  
Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2015 (Stand 02/2017)

## Welche Maßnahmen wurden bereits ergriffen

### 1988: TÖPFERS 10-PUNKTE PLAN



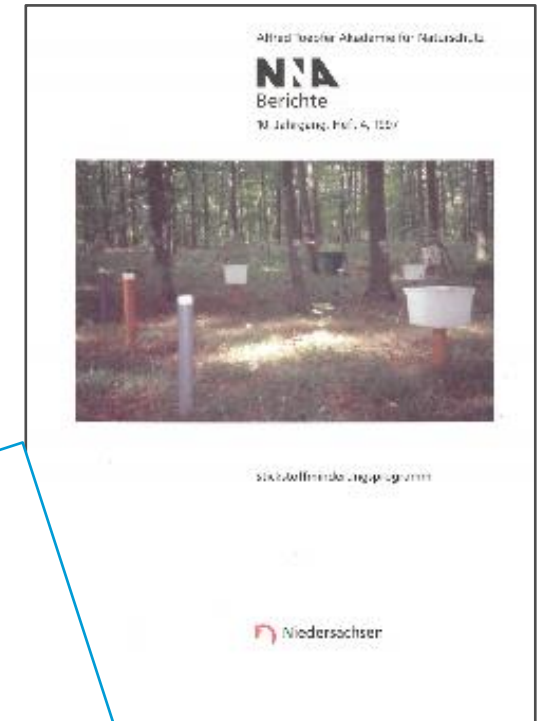
- 10-Punkte Katalog zum Schutz von Nord- und Ostsee; 22. Juni 1988
- Begrenzung der Stickstoffeinträge aus kommunalen Kläranlagen und industriellen Anlagen
- Herausnahme von Gewässerrandstreifen aus Düngung und Pflanzenbehandlung
- Novelle Abwasserabgabengesetz; Stickstoff 1994
- Beendigung der Dünnsäureverklappung
- Beendigung der Sonderabfallverbrennung auf der Hohe See
- Stärkung der ökologischen Meeresforschung
- Stärkung der Zusammenarbeit mit der DDR, der CSSR zur Bildung einer Elbe-Schutzkommission

## Welche Maßnahmen wurden bereits ergriffen

### 1996: Stickstoffminderungsprogramm der UMK / AMK

- *"Die Umweltministerkonferenz sieht mit Sorge die zunehmende Eutrophierung der Umweltmedien Boden und Wasser sowie der Wälder." 1993 beauftragte die UMK eine Arbeitsgruppe der Länder, „Maßnahmen zur Minderung von Stickstoffeinträgen in die Umweltmedien unter Berücksichtigung der wichtigsten Quellen und Belastungen vorzuschlagen...“.*
- Beteiligung der AMK
- Veröffentlichung in der Reihe der „Alfred Töpfer Akademie Naturschutz“

- Der Bericht erlangte nie eine politische Verbindlichkeit
- Maßnahmenliste und Forschungsbedarf im Wesentlichen identisch mit aktuellen Forderungen (zumindest für den Bereich Landwirtschaft)



## Welche Maßnahmen wurden bereits ergriffen

### AKTUELLE EUROPÄISCHE VERPFLICHTUNGEN UND NATIONALE UMSETZUNG

- Nitratrichtlinie (91/676/EWG) → Düngepaket
- NEC-Richtlinie 2001/81/EG → 39. BImSchV
- NERC-Richtlinie 2016/2284 → Neue Verordnung geplant
- Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG → 39. BImSchV
- Meeresstrategierahmenrichtlinie 2008/56/EG → Wasserhaushaltsgesetz
- Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG → Wasserhaushaltsgesetz
- Kommunalabwasserrichtlinie → Abwasserverordnung
- Gewässerschutzrichtlinie 2006/11/EG → Wasserhaushaltsgesetz
- IED-Richtlinie → TA Luft
- FFH-Richtlinie → BNatSchG

- Europäische Rahmengesetzgebung mit meist ambitionierten stickstoffbezogenen Zielen
- Nationale Umsetzung erfolgt in vielen unterschiedlichen Rechtsbereichen
- Unzureichende Umsetzung in Deutschland
- Vertragsverletzungsverfahren: Nitratrichtlinie & Luftqualitätsrichtlinie (NO<sub>2</sub>)
- Pilotverfahren: Wasserrahmenrichtlinie & NEC-Richtlinie (NH<sub>3</sub>)

### INTERNATIONALE VERPFLICHTUNGEN



- Multikomponentenprotokoll der Genfer Luftreinhaltekonvention
- Klimarahmenkonvention → Klimaschutzplan
- 9 Sustainable Development Goal mit Bezug zu Stickstoff → Nationale Nachhaltigkeitsstrategie



## Warum greifen die ergriffenen Regelungen nicht (gut genug)?

- Kontrolldefizit, keine Sanktionen → z.B. Düngeverordnung
- Gegenläufige Interessen Umwelt- und Wirtschaftspolitik → z.B. Ausbau der Tierhaltung, z.B. TA Luft, z. B. Diesel-Skandal
- Pollution Swapping → z.B. Biomasseverordnung, z. B. Düngegesetzgebung (schnellere Einarbeitung), z.B. TA Luft (Abdeckung Güllelager)
- Fehlende Kohärenz auf nationaler Ebene → z.B. BNatSchG und BImSchG, z.B. Düngegesetzgebung und Wasserhaushaltsgesetz (Zielwerte zum Schutz der Meeres- und Küstenökosystem), z.B. Düngegesetzgebung oder TA Luft und übergeordnete Ziele der (Einhaltung Critical Loads & Critical Levels)
- Unterschiedliche Zeitliche Ebenen → nationale bzw. Länder-Umsetzung kann nicht mit den europäischen Anforderungen Schritt halten; zu langsam

## Integrierte Stickstoffminderung

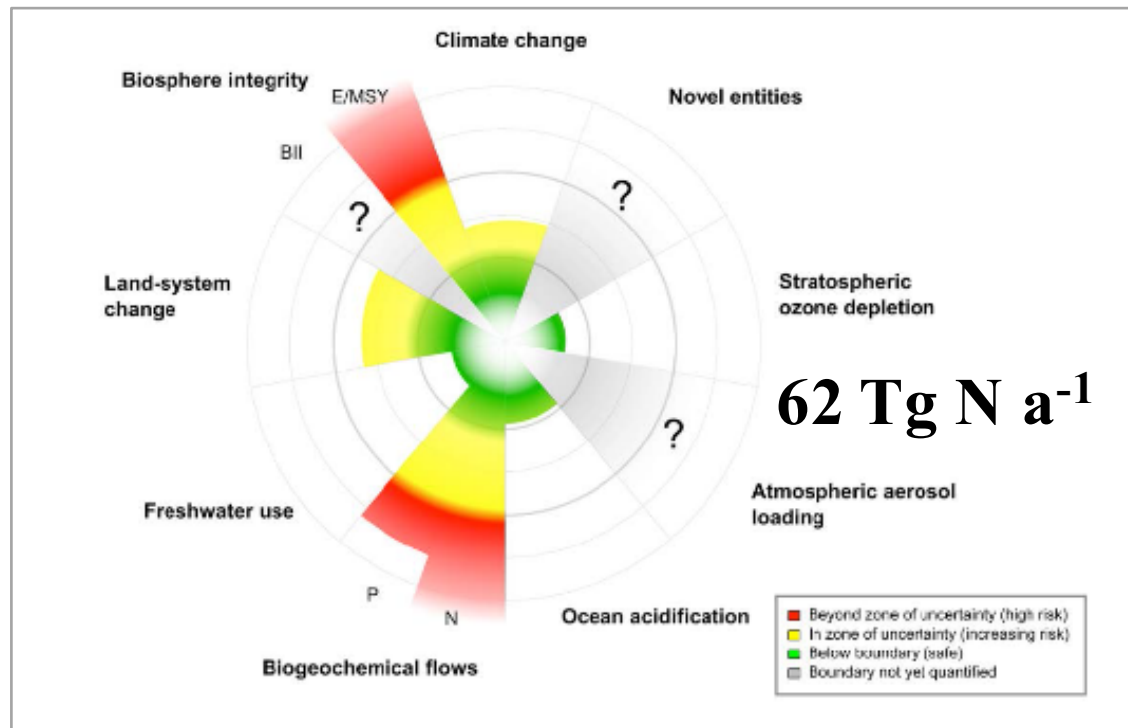
### VORTEILE

- Wird dem Stickstoffkreislauf gerecht
- Abbau von Pollution Swapping
- Abbau von Kohärenzdefiziten
- Stärkung von Synergien
- Verminderung von gegenläufigen Entwicklungen die sich gegenseitig aufheben
- volkswirtschaftliche Optimierung
- Maßnahmenoptimierung
- Kommunikative Optimierung
- Gemeinsame Ziele (horizontale Integration & vertikale Integration)

## Integrierte Stickstoffminderung im internationalen Rahmen

### PLANETARE GRENZE FÜR GLOBALE STICKSTOFFFIXIERUNG

- Integriert über verschiedene Wirkungen und Verursacherbereiche
- Erleichtert die Kommunikation eines komplexen Problems
- Nicht einfach auf den nationalen Maßstab übertragbar



Steffen, W., et al. (2015). "Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet." [ScienceXpress DOI: 10.1126/science.1259855](https://doi.org/10.1126/science.1259855).

De Vries, W., et al. (2013). "Assessing planetary and regional nitrogen boundaries related to food security and adverse environmental impacts." [Current Opinion in Environmental Sustainability](#) 5(3-4): 392-402.

## Integrierte Stickstoffminderung im internationalen Rahmen

**Task Force on Reactive Nitrogen (TFRN)** der Genfer Luftreinhaltekonvention (CLRTAP) im Rahmen der UNECE

- Erarbeitet integrierte Lösungsansätze zur Politikberatung für die CLRTAP, z.B. European Nitrogen Assessment
- Handlungsempfehlungen werden teilweise auch von der EU in Richtlinien aufgenommen (z.B. Leitfaden zur Erstellung integrierter nationaler Stickstoffbilanzen im Rahmen der NERC-Richtlinie)

**7. EU Umweltaktionsprogramm für die Zeit bis 2020 „Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten“**

- „den gesamten Stickstoffkreislauf nachhaltig und ressourceneffizient regeln“

**International Nitrogen Initiative (INI)**

- Globales Wissenschafts-Netzwerk
- Optimierung des positiven Stickstoffnutzen in Nahrungsmittelproduktion und Energieumwandlung bei gleichzeitiger Minimierung der negativen Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt
- Reihe Globale Konferenzen im Drei-Jahres Rhythmus → 2020 auf Einladung von BMUB und UBA in Berlin: „Nitrogen and the Sustainable Development Goals“

**International Nitrogen Management System (INMS)**

- Globale, UN Environment gefördertes Projekt zur Vorbereitung eines „Global Nitrogen Assessment“

## Integrierte Stickstoffminderung auf nationaler Ebene

- 1996: Stickstoffminderungsprogramm
- 2009: Integrierte Stickstoffminderungsstrategie des Umweltbundesamtes
- 2015: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem (SRU)
- 2015: Reaktiver Stickstoff in Deutschland (UBA)
- 2017: Stickstoffeintrag in die Biosphäre (Erster Stickstoffbericht der Bundesregierung)



Umwelt  
Bundes  
Amt





## Integrierte Stickstoffminderung auf nationaler Ebene

### FAZIT und AUSBLICK

- Stickstoffkreislauf komplexes System, viele Verursacher, viele Wirkungen
- Einzelne Aspekte konnten hier in diesem Vortrag nicht angesprochen werden (Belastungssituation, Konsumer-Perspektive)
- Gegenwärtige Regelungen Vielseitig aber nicht ausreichend aufeinander abgestimmt
- Integration bringt Vorteile gegenüber sektoraler Behandlung
- UBA wird im Rahmen von Forschungsprojekten weiterhin an Grundlagen für einen integrierten Ansatz arbeiten
- Zweiter Stickstoff-Bericht der Bundesregierung?

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

**Markus Geupel**

markus.geupel@uba.de

[www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme/reaktiver-stickstoff-in-der-umwelt](http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/wirkungen-von-luftschadstoffen/wirkungen-auf-oekosysteme/reaktiver-stickstoff-in-der-umwelt)